

33-6200-001

INSTITUT FÜR BAUSTOFFE, MASSIVBAU UND BRANDSCHUTZ  
TECHNISCHE UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG

Gasdichtigkeit vorhandener Bausubstanz

von

Dr.-Ing. J. Steinert

Braunschweig, November 1986

BIBLIOTHEK  
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
der Technischen Universität Braunschweig  
Beethovenstraße 52  
D-3300 Braunschweig

Die Untersuchungen wurden im Auftrag und mit finanzieller  
Unterstützung des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen  
und Städtebau durchgeführt: Geschäftszeichen B I 7 - 81 07 83 - 7

Postsendungen:  
Beethovenstraße 52, 3300 Braunschweig  
Erfüllungsort und Gerichtsstand: Braunschweig

Fernsprecher: (05 31) 381 5431

Fernschreiber: 0 52 688 1626 d  
Telegrammadresse: MPA Braunschweig

Zur Vermeidung von Verzögerungen wird dringend gebeten, Zuschriften nur an das Institut zu richten, nicht aber an einzelne Mitarbeiter.

## 1. Einleitung

Der Schutzraumbau in der Bundesrepublik Deutschland konzentriert sich auf Großstädte und dort auf Mehrzweckanlagen (Tiefgaragen und U-Bahnhöfe). In kleineren und mittleren Städten wurden in der Vergangenheit durch die öffentliche Hand kaum Gemeinschaftsschutzbauten errichtet. Die Bevölkerung außerhalb von Großstädten wäre daher bei begrenzt flächendeckenden Angriffen oder Industrie-Unfällen vielerorts schutzlos bzw. auf den geringen und bisher nicht bekannten Schutz angewiesen, den die vorhandene Bausubstanz bietet.

Über den Sinn und die Möglichkeiten, Katastrophen durch Aufsuchen eines Schutz gewährenden Raumes zu überleben, wurde in den letzten Jahren viel diskutiert. Grundsätzlich beruht die Hoffnung, in einem Schutzraum überleben zu können, auf der Abschirmung möglichst vieler lebensfeindlicher Einwirkungen und deren Folgen, z.B.

- Explosionsdruck und Zertrümmerung
- Feuerausbreitung und Einsturz brandgeschädigter Bauten
- Einwirkung toxischer Gase
- Strahleneinwirkung mit momentanen und langfristigen Folgen

Die Schutzaufgaben erfordern daher Vorkehrungen gegen

- Beanspruchung durch Trümmerlasten
- Brandeinwirkung
- Eindringung radioaktiven Fallouts sowie chemischer Kampfmittel und biologischer Kampfstoffe

Über diesen "Grundschutz" hinausgehend, sind beim "Verstärkten Schutz" zusätzliche Maßnahmen gegen Luftstoßbelastung und radioaktive Anfangsstrahlung erforderlich.

Grundsätzlich muß daher jeder Schutzraum, der diese Bezeichnung verdient, nicht nur mit einer trümmersicheren Decke ausgestattet

sein, sondern auch mit einer Lüftungsanlage, um die Wärme durch Strahlung (sensible Wärme) und Feuchteabgabe (latente Wärme) abzuführen, den Sauerstoffbedarf zu decken und den durch Ausatmung und Ausdünstung erzeugten Schadstoffgehalt der Luft zu senken.

Im Schutzraum geht Sicherheit vor Wohlbefinden. Für einen langfristig erträglichen Aufenthalt im Schutzraum ist folgendes Voraussetzung:

- ausreichender Luftwechsel:  $O_2 \geq 19 \%$  bzw.  $CO_2 \leq 2 \%$
- Taupunkttemperatur der Raumluft  $\leq 29 \text{ }^\circ\text{C}$
- Raumüberdruck  $\geq 50 \text{ Pa}$  (0,5 mbar).

Diese Bedingungen werden gewährleistet, wenn die raumluftechnische Anlage - bei Schutzlüftung - einen Luftvolumenstrom von  $1,8 \text{ m}^3/\text{h}$  je Person über ein geeignetes Filter in den Schutzraum fördert. Dabei wird für einen dauernden Aufenthalt ein spezifisches Raumvolumen von  $1,38 \text{ m}^3$  Luftraum pro Person für erforderlich gehalten, was bei einer Raumhöhe von 2,30 m eine Belegungsdichte von  $0,6 \text{ m}^2$  pro Person entspricht /1/.

In Hausschutzräumen werden an die Mindestgröße von Grundfläche und Rauminhalt folgende Anforderungen gestellt /2/:

- bis 7 Personen:  $6 \text{ m}^2$  und  $14 \text{ m}^3$
- für jeden weiteren Schutzplatz für  
8 bis 25 Personen:  $6 \text{ m}^2 + 0,5 \text{ m}^2/\text{Person}$  und  $14 \text{ m}^3 + 1,15 \text{ m}^3/\text{Person}$
- 26 bis 50 Personen:  $0,6 \text{ m}^2/\text{Person}$  und  $1,40 \text{ m}^3/\text{Person}$

jeweils zuzüglich  $1,30 \text{ m}^3$  (bis 25 Plätze) oder  $1,70 \text{ m}^3$  (bis 50 Plätze) für die Lüftungsanlage. Die Grundrißform ist beliebig; das Seitenverhältnis darf jedoch 2:1 nicht überschreiten.

Mit den nachfolgend beschriebenen Untersuchungen wird eine Detailfrage der eingangs geschilderten Problematik behandelt. Es wird untersucht, welche Gasdichtigkeit - unter Bezug auf den erforderlichen Raumüberdruck von 50 Pa - Räume besitzen, deren Umfassungswände aus Mauerwerk oder mit üblichen Rissen behafteten Stahlbetonbauteilen bestehen, und ob sich die Gasdichtigkeit bereits im Stadium der Auswahl eines Raumes zum Ausbau als Schutzraum zuverlässig prüfen läßt.

Hierzu wurden an fünf, von ihrer Größe als Hausschutzraum geeigneten Räumen Untersuchungen der Gasdichtigkeit mit Luft durchgeführt. Diese Meßräume wiesen - beabsichtigt - Risse und teilweise auch Öffnungen (kleinflächige Fenster, Durchbrüche zu Nachbarräumen u.ä.) auf, die zur Durchführung der Gasdichtigkeitsprüfung in geeigneter Weise verschlossen werden mußten.

Die Prüfung auf Gasdichtigkeit erfolgte in der Weise, daß die Eingangstür durch eine angepaßte dichte Platte ersetzt wurde, in der sich das Überdruckventil und Öffnungen zum Lufteintritt und zur Messung des Raumüberdrucks befanden. Als Kriterium für die Gasdichtigkeit wurde sowohl der zur Erzeugung eines bestimmten Überdrucks erforderliche Luftvolumenstrom bei stationärem Lüfterbetrieb als auch der Druckabfall nach Absperren des Lüfters verwendet.

Die hier untersuchte Fragestellung wurde bisher an keiner anderen Stelle behandelt. Literatur über vergleichbare Untersuchungen ist daher nicht vorhanden. Am Beginn der Arbeiten wurde jedoch mit Mitarbeitern der Erprobungsstelle 91 der BW in Meppen, in der die Dichtigkeit von Türen und Abschlüssen geprüft wird, ein sachdienliches Gespräch geführt.

Auf Wunsch des Förderers ist für die Untersuchungen, der Ausstattung üblicher Hausschutzräume bis 25 Personen entsprechend, ein handbetriebener Lüfter für Schutzlüftung des Typs SL 0,75 sowie ein Überdruckventil und eine Schnellschlußarmatur der Nennweite 100 der A. Piller KG, Osterode, verwendet worden.

## 2. Versuchsdurchführung

### 2.1 Auswahl und Beschaffenheit der MeBräume

Die MeBräume sollten folgende Bedingungen erfüllen:

- Aufgrund ihrer Größe sollten sie sich als Hausschutzräume eignen, d.h.

$$6 \leq A \leq 30 \text{ m}^2 \quad \text{sowie} \quad 14 \leq V \leq 70 \text{ m}^3$$

- Wenigstens eine Wand sollte aus Mauerwerk bestehen.
- Der Raum sollte im Ausgangszustand augenscheinlich nicht dicht sein, d.h. - außer der Eingangstür - sollten Fenster bzw. Durchbrüche und/oder mehr oder weniger ausgeprägte Wand- und Deckenrisse vorhanden sein.
- Die Räume sollten längerfristig verfügbar, trocken, leer (zur Bestimmung des Luftvolumens) sein und einen geeigneten Vorraum zur Geräteaufstellung besitzen.

Die endgültig aufgrund der vorgenannten Kriterien ausgewählten fünf MeBräume sind in Tabelle 1 beschrieben.

Die vorgenannten Bedingungen konnten in Wohngebäuden nur teilweise gleichzeitig erfüllt werden. Da außerdem der Wunsch bestand, den Einfluß von Undichtigkeiten auf die zur Erzielung konstanten Überdrucks notwendige Fördermenge zu untersuchen, wurden anstelle von Kellerräumen zwei Schall-Prüfstände des Instituts in die Untersuchungen einbezogen.

Meßraum 1 ist der Meßraum eines Armaturengeräusch-Prüfstandes nach DIN 52 218, also ein leerer Raum mit bestimmter Nachhallzeit, an dessen 11,5 cm dicker Außenwand ein Wasserrohr befestigt ist, dessen Schallabstrahlung im Rauminnen gemessen werden kann. Der Raum hat an Vorder- und Rückseite zwei Öffnungen von 100 mm Durchmesser, deren eine sich durch Einsatz von Rohrstutzen unterschiedlichen Durchmessers und Abschluß mit Siebblechen gut zu einer Variation von Undichtigkeiten eignete.

Tabelle 1: Kenndaten der Meßräume

Laufende Nummer und übliche Nutzung

- 1 Armaturenprüfstand (Armaturengeräusche)
- 2 Wand-Prüfstand (Luftschalldämmung)
- 3 Hobbykeller (Reihenhaus)
- 4 Vorratskeller (Reihenhaus)
- 5 Schutzraum im Bunker Borsigstraße in Braunschweig

Abmessung und Aufbau		Einheit	Meßraum-Nummer				
			1	2	3	4	5
Länge		m	4,04	4,65	5,39	4,64	6,93
Breite		m	3,58	4,01	4,38	2,87	2,90
Höhe		m	2,80	2,64	2,10	2,09	2,61
Grundfläche		m²	14,5	18,6	23,6	13,3	20,0
Volumen		m³	40,4	49,2	49,6	27,8	52,5
Anzahl der Schutzplätze <sup>1)</sup>		-	24	32	38	19	35
Decke	Dicke	cm	17	20	17	17	?
	Baustoff	-	Stb.	Stb.	Stb. <sup>6)</sup>	Stb.	Stb.
	Zustand	-	o.B.	o.B.	o.B.	o.B.	o.B.
Wand 1 (mit Tür)	Dicke	cm	24	24	24	24/36,5	53
	Baustoff	-	Mz	Mz	KSL	KSL	Mz
	Zustand	-	2)	o.B.	o.B.	5), 8)	10)
Wand 2 (Wand 1 gegenüber)	Dicke	cm	24	24	36,5	24	100
	Baustoff	-	Mz	Mz	KSL	KSL	Stb.
	Zustand	-	2)	o.B.	4)	o.B.	10)
Wand 3 (rechts von Wand 1)	Dicke	cm	11,5	24	24/36,5	36,5	24
	Baustoff	-	Mz	9)	KSL	KSL	Mz
	Zustand	-	o.B.	-	o.B.	5)	10)
Wand 4 (links von Wand 1)	Dicke	cm	24	24	11,5	24	24
	Baustoff	-	Mz	Mz	KSL	KSL	Mz
	Zustand	-	2)	3)	7)	o.B.	o.B.
Fußboden		-	schw. Estrich auf Beton- boden	Stb.- Platte o. Auf- lage	Mager- beton o. Auf- lage	Mager- beton o. Auf- lage	Stb.- Decke m. Ver- bund- estrich

Erläuterungen siehe Blatt 7

### Erläuterungen zu Tabelle 1

- 1) Die Berechnung der Schutzplatzanzahl erfolgte nach Fläche und Volumen; die bestimmende Größe ist durch Unterstreichung kenntlich gemacht. Die Angabe in Tabelle 2 beruht allein auf der Luftmenge pro Person.
- 2) Risse unterhalb des Deckenaufagers ausgekratzt und mit Mörtel verstrichen, nach Augenschein dicht
- 3) Diese Wand ist nicht in die flankierenden Wände eingebunden, sondern stumpf gegen diese gesetzt; sie kann so leicht ausgebaut werden und durch andere Prüfwände ersetzt werden.
- 4) In voller Höhe erdberührt, jedoch mit zwei Schachtfenstern
- 5) Zu 4/5 erdberührt
- 6) Umlaufend vom Mauerwerk abgerissen, teilweise verläuft der Riß in der 1. und 2. Steinlage unterhalb der Decke
- 7) Es handelt sich um eine Raumtrennwand mit Tür und drei Öffnungen mit einer Fläche von jeweils 27 x 25 cm<sup>2</sup>
- 8) Starke Risse, von den Ecken des Kellerfensters ausgehend
- 9) Beschreibung dieser Wand siehe Blatt 21
- 10) Wand 2 enthält drei verschließbare Frischluftschächte, Wand 1 und 3 besitzen Durchbrüche, teilweise aus der Zeit der Nachkriegsnutzung.

Der Meßraum 2 hingegen ist ein Raum eines Wand-Prüfstandes zur Bestimmung der Luftschalldämmung nach DIN 52 210, also ein ebenfalls leerer Raum, der die Möglichkeit bot, eine 12 m<sup>2</sup> große Trennwand nach freier Wahl einzubauen. Hierzu wurde eine Wand, bestehend aus 5 m<sup>2</sup> Abbruch-Vollziegelmauerwerk und 7 m<sup>2</sup> Kalksand-Vollsteinmauerwerk gewählt, siehe Blatt 21.

Die Türen sämtlicher Meßräume besaßen Zargen mit mindestens dreiseitig umlaufender Dichtung. Die Meßräume 1, 3 und 4 bestanden außen und innen aus Sichtmauerwerk, Meßraum 2 war nur innen geputzt, bis auf die Prüfwand, und am Meßraum 5 war Wand 1 nur innenseitig und die Wände 3 und 4 beidseitig geputzt. Die Nummerierung der Wände ist in Tabelle 1 erläutert.

## 2.2 Durchführung der Messungen

### Luftdichter Abschluß der Räume

In allen Fällen wurden die Türen der Räume ausgehängt oder vollständig geöffnet und in der normalen Schließebene eine maßgerecht vorbereitete, beidseitig mit Kunststoff beschichtete Tischlerplatte angeordnet. Diese im folgenden als Raum-Abschlußplatten bezeichneten Platten waren - je nach Meßumfang - mit 2 bis 4 Bohrungen (Ø 30 bis 100 mm) zum Einbau entsprechender Meßgeräte versehen sowie mit 2 x 3 = 6 Bohrungen mit Ø 10 mm, durch die lange Schloßschrauben zur Befestigung der Platten geführt wurden. Die Befestigung erfolgte durch Anspannen der Schloßschrauben mit Flügelmuttern gegen Holzriegel, die sich ihrerseits auf der Innenseite des Raumes gegen Wand oder Zarge abstützten. Zum Einbau und zur innenseitigen Abdichtung der Raum-Abschlußplatte mußte sich über die Zeitdauer der Messung eine Person im Meßraum aufhalten.

Zur Abdichtung sowohl der Platten als auch aller anderen Stellen wurde kunststoffmodifizierter Kitt verwendet, Fabrikat PERENNATOR TX 2001 S, der sich hierfür als gut geeignet erwies.



Größere Öffnungen, wie Fensterflächen und Durchbrüche, wurden entweder zweilagig mit 0,2 mm dicker PE-Folie abgedeckt, die am Rand mittels 5 cm breiter TESA-Bandstreifen in der Wandebene gehalten wurden, oder es wurden Füllkörper aus 30 mm dickem extrudierten Hartschaum hergestellt, in die Öffnungen eingepaßt und gegen die angrenzenden Wandflächen mit Kitt abdichtet. Beide Maßnahmen erwiesen sich gleichermaßen als brauchbar.

### Druckerzeugung

Als Lüfter zur Erzeugung des Raum-Überdrucks wurde von Firma A. Piller/Osterode freundlicherweise ein handbetriebener Schutzraum-Lüfter für Schutzlüftung mit 0,75 m<sup>3</sup>/min Förderleistung \*) zur Verfügung gestellt. Entsprechend den allgemeinen Grundsätzen kann mit der Nennfördermenge in einem hinreichend dichten Schutzraum für  $Z = \frac{60 \cdot 0,75}{1,80} = 25$  Personen bei  $V_0 = 1,38 \cdot 25 = 34,5$  m<sup>3</sup> Raumvolumen ein Überdruck von mindestens 50 Pa erreicht werden. Dabei sollte die Drehzahl an der Handkurbel des Lüfters 55 Umdrehungen pro Minute nicht überschreiten. Weil die für die Untersuchungen ausgewählten Meßräume überwiegend größere Raumvolumina als 35 m<sup>3</sup> besitzen, somit für eine größere Anzahl als 25 Schutzplätze geeignet wären, mußte auch ein größerer Luftstrom in die Räume eingeblasen werden. Deshalb waren zur Erzeugung von 50 Pa i.a. größere Drehzahlen als 55 Upm erforderlich, was somit allein noch keinen Verstoß gegen die Dichtigkeitsanforderung darstellt. Bei einem Ausbau derartiger Räume hätte man einen Lüfter mit größerem Nenn-Luftvolumenstrom gewählt. In der die Meßergebnisse für stationären Lüfterbetrieb zusammenfassenden Tabelle 2 ist für jeden Raum die entsprechende Nenn-Luftmenge und Nenn-Drehzahl angegeben.

An den Ausblasstutzen des Lüfters SL 0,75 wurde ein rohrförmiger Übergangsstutzen aus 2 mm PVC-Material angeflanscht und darauf ein 1,5 m langer Kunststoffschlauch mit 40 mm Innendurch-

---

\*) "Transportable Gassicherheits-Prüfanlage Typ PG 0,75 T"

messer gesteckt, dessen anderes Ende durch eine Bohrung in der rechten oberen Ecke der Raum-Abschlußplatte geführt (Innenüberstand ca. 10 bis 20 cm) und dort eingedichtet wurde. Der Aufstellbereich des Lüfters war somit durch die Länge des Zuluftschlauches begrenzt.

Der Lüfter ist mit einem Durchflußmeßgerät nach dem Schwebekörperprinzip ausgestattet, unskaliert, jedoch mit Markierungen für einen Soll-Durchfluß von  $0,4 \text{ m}^3/\text{min}$  (13 Personen-Schutzraum?) und bei  $\pm 10 \%$  des Soll-Wertes.

Wie aus Tabelle 2 ersichtlich ist, waren - planmäßig - hohe Drehzahlen erforderlich, um den notwendigen Luft-Volumenstrom für einen Überdruck von 50 Pa zu erreichen. Da der Leistungsbedarf mit der 3. Potenz der Drehzahl steigt - also auch der Kraftaufwand - wurde der Einsatz eines netzstrombetriebenen Lüfters beschlossen und hierfür ein Lüfter der Type ERM 18 der Firma Maico-Ventilatoren, Villingen-Schwenningen, gewählt.

Dieser drehzahlsteuerbare Halbradial-Rohrventilator besitzt folgende Betriebsdaten:

Lauftrad-Durchmesser	170 mm
Drehzahl	$\leq 2760 \text{ min}^{-1}$
Fördervolumen im Leerlauf	$310 \text{ m}^3/\text{h} = 5,17 \text{ m}^3/\text{min}$

Der Ventilator-Ansaugstutzen wurde mit einem werkmäßigen Reduzierstück auf Nennweite 100 mm herabgesetzt. Auf der Ausblasseite wurde eine automatische Rohr-Rückschlagklappe mit Gummidichtung (Type AVM 18) angeordnet, die bei 10 Pa Druckdifferenz öffnet.

Die Drehzahl des Lüfters konnte mit einem nach dem Phasenschnittverfahren arbeitenden elektronischen Drehzahlsteller (Type ST 1) stufenlos geregelt werden.

Dieser Lüfter wurde dann jedoch nur noch im kleinsten Meßraum 4 probeweise eingesetzt und hierbei die Luft durch eine Bohrung im oberen Drittel, auf der Mitte der Längsachse, der Raum-Abschlußplatte in den Meßraum eingeblasen. Wie sich dabei gezeigt hat, wäre ein Lüfter kleineren Durchmessers günstiger, weil damit die Messung des Volumenstromes entlang einer kürzeren Meßstrecke möglich ist.

## Oberdruckentlastung und Schnellschluß

Lüftungsanlagen für kombinierte Lüftung, also Schutz- und Normallüftung, müssen mit Absperrarmaturen ausgestattet sein, die schnell einen dichten Verschuß der Ansaugleitung für Normalluft gewährleisten. Hierfür werden in Hausschutzräume Schnellschlußklappen SK 100 eingebaut. Eine derartige Armatur wurde bei bestimmten Messungen mit in die Raum-Abschlußplatte (mittig) eingelassen und teilweise auch über diese Armatur die Luft in den Meßraum geblasen. Dieses Verfahren hat den Vorteil, daß durch Betätigen der Schnellschlußarmatur (SSA) der Luftstrom momentan unterbrochen und damit der Meßraum dicht abgeschlossen werden kann. Beides ist Voraussetzung, um den Druckabfall im Raum messen zu können. Abschalten des elektrisch betriebenen oder "Anhalten" des mechanisch betriebenen Lüfters wären hierfür nicht geeignet.

Der Oberdruck im Schutzraum wird üblicherweise durch den Einbau eines Überdruckventils (OV) begrenzt. Bei den durchgeführten Untersuchungen wurde deshalb ein Ventil OV 100 jeweils mit in die Raum-Abschlußplatte (unter der Schnellschlußarmatur) eingelassen.

Das Überdruckventil besteht im Prinzip aus einem kurzen Rohr mit Flansch, dessen Schnittfläche um wenige Grad gegen die Senkrechte geneigt ist und dessen freier Querschnitt durch eine oberhalb des Rohres gelenkig angebrachte Platte (Ventilklappe) bestimmten Gewichts verschlossen wird. Diese Klappe wird bereits bei geringem Druck geöffnet, mit zunehmendem Überdruck wird die Raumluft über einen wachsenden Flächenanteil des Rohrquerschnitts abgeblasen. Hierdurch werden die Dichtigkeitsunterschiede verschiedener Meßräume verfälscht; denn alle Räume haben damit ungefähr dieselbe Undichtigkeit, nämlich mindestens die, die das Überdruckventil im geöffneten Zustand besitzt. Um die Dichtigkeit besser beurteilen zu können, wurde deshalb in jedem Meßraum mindestens eine Messung mit arretierter Klappe des Überdruckventils durchgeführt.

### Drehzahlmessung

Lüfterdrehzahl und geförderte Luftmenge sind zwar einander proportional, jedoch ist die Steigung dieses linearen Zusammenhanges abhängig von der Dichtigkeit des Raumes. Deshalb wurde die zur Erzielung eines bestimmten Raumüberdrucks erforderliche Drehzahl am Schutzlüfter SL 0,75 wie folgt ermittelt. In der Nähe der Handkurbel wurde ein induktiver Wandler angebracht. Immer wenn die Kurbel am Wandler vorbeigeführt wird, wird in diesem ein Stromstoß erzeugt, der auf einem Registrierstreifen mit vorgegebener Papiergeschwindigkeit aufgezeichnet werden kann. Aus diesem Schrieb ist die Lüfterdrehzahl leicht abzugreifen, aber auch die Gleichmäßigkeit des Drehens, also der Luftförderung, zu ersehen.

### Differenzdruckmessung

Zur Messung des Raumüberdrucks wurde ein Differenzdruckaufnehmer - Nenndruck 1 kPa - in die linke untere Ecke der Raum-Abschlußplatte eingelassen. Der passive Druckaufnehmer wurde in Verbindung mit einer Trägerfrequenz-Meßbrücke betrieben, von der das Signal einem Schreiber zugeführt wurde. Hierdurch war eine Beurteilung der Druckkonstanz (Drehzahlkonstanz) auf dem Registrierschrieb möglich, was sich für die Ablesung des zur Volumenstrommessung verwendeten trägen Schrägrohrmanometers als vorteilhaft erwies.

Der Abstand zwischen Lufteinlaß- und Druckmeß-Ort betrug mehr als 2 m, eine Rückkopplung und Fehlmessung war somit nicht zu erwarten.

Bei der Durchführung der Messungen zeigte es sich, daß Differenzdrücke  $\leq 15$  Pa für Meßzwecke ungeeignet sind, da diese durch Türenöffnen, schnelle Temperaturänderungen u.a.m. starken Schwankungen unterliegen. Insofern wird auch im Schutzraum ein Überdruck von 50 Pa als untere Grenze zur Abwehr von Stäuben und belasteten Gasen angesehen.

In der gleichen Weise wie der Überdruck oder Differenzdruck gegen den Druck außerhalb des Meßraumes läßt sich in Verbindung mit einem schnellen Schreiber auch seine zeitliche Änderung messen, z.B. nach Betätigen der Schnellschlußarmatur. Bekanntermaßen nimmt in einem abgeschlossenen Volumen mit kleinen Undichtigkeiten der Hüllfläche der Druck exponentiell mit der Zeit ab, d.h. die Druckänderung ist proportional zu dem momentanen Überdruck. Der Absolutwert des Druckabfalls wird beschrieben durch die Druck-Abklingzeit, die naturgemäß um so länger ist, je besser die raumabschließenden Flächen abgedichtet sind.

Mit Hilfe eines Pegelschreibers wird ein exponentieller Druckabfall als linearer Zeitvorgang dargestellt. Daraus kann leicht die Abklingzeit, d.h. die Zeit, in der Druck auf den e-ten Teil abnimmt, bestimmt werden. Von dieser Möglichkeit, die Dichtigkeit eines Raumes in zusätzlicher Weise zu charakterisieren, wurde bei einigen Meßräumen Gebrauch gemacht. Die Durchführung einer derartigen Messung ist schwieriger als die stationäre Durchflußmessung, ein elektrisch betriebener Lüfter mit ansteuerbarer Verschußklappe der Ausblasöffnung wäre hierfür von erheblichem Vorteil.

Aus den Druck-Abklingvorgängen wurde der zur Aufrechterhaltung einer stationären Durchströmung der Undichtigkeiten notwendige Volumenstrom abgeschätzt, Herleitung siehe Anlage 12.

### Volumenstrommessung

Die Kenntnis des vom Lüfter SL 0,75 geförderten Luftvolumenstromes setzt die Messung der Luftgeschwindigkeit voraus, die hier überwiegend mit einem Staurohr aus dem dynamischen Druck ermittelt wurde.

In den Stutzen auf der Ansaugseite des Lüfters wurde ein 60 cm langes Rohr von 45 mm Innendurchmesser eingesetzt, das in 36 cm Abstand vom freien Ansaugende (Einlaufstrecke  $> 6 d$ ) mit einer Bohrung zur Aufnahme eines Prandtlischen Staurohres von 3 mm

Durchmesser versehen war. Dynamischer und statischer Druck wurden mit Schrägrohrmanometern mit 100 bzw. 200 Pa Meßbereich ermittelt; kleinste meßbare Drücke 0,5 bzw. 1 Pa:  $v \leq 0,9$  m/s.

Der kleine Durchmesser des Staurohres wurde gewählt, um den Luftstrom im Ansaugrohr möglichst wenig zu verfälschen. Damit war jedoch der Nachteil einer größeren Trägheit gegen Druckschwankungen verbunden.

Die Staurohr-Öffnung wurde entgegen üblichen Empfehlungen auf der Rohrachse angeordnet, da der Ort der mittleren Geschwindigkeit nicht genau genug ermittelt werden konnte. Daher ist den Auswertungen gemäß DIN 1946 als mittlere Geschwindigkeit  $0,9 v_{\max}$  zugrunde gelegt worden /3/.

Die Messungen wurden bei Meßraum-Temperaturen zwischen 17 und 22 °C, 40 bis 70 % rel. Feuchte und - schätzungsweise - Luftdrücken zwischen 970 und 1020 hPa durchgeführt. Eine Korrektur der Luftdichte erfolgte bei der Auswertung nicht; der Fehler ergibt sich rechnerisch ungefähr zu  $\pm 3$  %.

Bei Verwendung des Maico-Lüfters wurde zur Bestimmung der Luftgeschwindigkeit ein Ansaugrohr von 100 mm Innendurchmesser und 1 m Länge auf der Saugseite des Lüfters angesetzt. Wegen des relativ großen Rohrdurchmessers ist die Strömungsgeschwindigkeit bereits so klein, daß sie nicht mehr mit einem Staurohr ermittelt werden kann; sie wurde deshalb mit einem Thermo-Anemometer (Fabrikat Alnor) gemessen; Ansprechschwelle 0,05 m/s.

Prinzipiell wäre die Verwendung eines kürzeren Meßstutzens wünschenswert, jedoch ist eine Verringerung des Querschnitts zur Verkürzung des Ansatzstückes nicht sinnvoll, weil hierdurch die Messungen verfälschende Druckverluste hervorgerufen werden. Besser wäre die Verwendung eines Rohrlüfters mit kleinerem Durchmesser.

## 2.3 Ablauf der Messungen

Nach Abschluß der vorbereitenden Abdichtungsarbeiten wurde die Raum-Abschlußplatte mit den darin eingelassenen Armaturen und Anschlüssen in der Türebene angebracht.

Die Dichtigkeit der Meßräume wurde überwiegend in den folgenden Zuständen geprüft:

Einblasen im Bereich der rechten oberen Ecke der Raum-Abschlußplatte:

Messung 1: Überdruckventil in betriebsgemäßem Zustand

Messung 2: Überdruck-Ventilklappe arretiert

Einblasen der Luft über die Schnellschlußarmatur

Messung 3: Überdruckventil in betriebsgemäßem Zustand

Messung 4: Überdruck-Ventilklappe arretiert.

Das Verfahren, die Luft jeweils durch eine Bohrung in der oberen Ecke der Abschlußplatte einzublasen, wurde bereits bei den ersten Messungen, also ehe Überdruckventil und Schnellschlußarmatur zur Verfügung gestellt werden konnten, festgelegt. Somit bestand nicht bei allen Messungen die Möglichkeit, die Luft durch die Schnellschlußarmatur einzubringen und damit zugleich den Druckabfall durch "Abschalten" der Luftförderung zu messen.

Die Messungen 1 und 3 bzw. 2 und 4 sollten prinzipiell zum selben Ergebnis führen. Da jedoch der Zuluftschlauch in beiden Fällen unterschiedlich verlegt werden mußte und die Absperrarmatur einen größeren Widerstand besitzt als die offene Ausblasmündung des Schlauches, woraus sich eine etwas andere Netzkennlinie ergeben kann, wurden jeweils beide Messungen durchgeführt.

Die Messungen selbst wurden in der Weise durchgeführt, daß ein vorgegebener Überdruck im Raum durch möglichst gleichmäßiges Drehen der Handkurbel des SL 0,75 aufgebaut und über 1 bis 2 Minuten konstant gehalten wurde, um in dieser Zeit den dynamischen Druck am Schrägrohrmanometer abzulesen. Demgemäß erfolgten die Messungen bei arretierter Klappe des Überdruckventils bei 10, 30, 50, 80 und 100 Pa.

Bei Normalzustand des Überdruckventils konnten die beiden letzten Druckstufen - funktionsgemäß - nicht erzeugt werden; hierzu reichte die Leistung des Lüfters nicht aus; höchster Druck bei rd. 1 m<sup>3</sup>/min: ca. 65 Pa. Die zur Erzeugung von 10 Pa erforderliche Fördermenge war, abgesehen von größeren Undichtigkeiten, so gering, daß sie an der Ansprechschwelle von Staurohr und Manometer lag.

Es sei noch darauf hingewiesen, daß zur Messung von Volumenstrom, Drehzahl und Abklingzeit jeweils getrennte Messungen erforderlich waren, da nicht alle Meßgeräte gleichzeitig angeschlossen bzw. abgelesen werden konnten.

Auf weitere Einzelheiten zur Durchführung der Messungen wird im folgenden Abschnitt eingegangen.



### 3. Meßergebnisse

Die Meßwerte sind in den Anlagen 1 bis 11 dargestellt. Hieraus wurden die Volumenströme zur Erzeugung eines Raumüberdruckes von 50 Pa und der Druck, der in den einzelnen Meßräumen bei Volumenströmen von 0,4 und 0,75 m<sup>3</sup>/min erzeugt werden kann, entnommen und in Tabelle 2 zusammengefaßt. Ferner ist in dieser Tabelle der auf das Raumvolumen bezogene Nenn-Volumenstrom angegeben sowie die Drehzahlen zur Erzeugung von 50 Pa Überdruck und für einen Volumenstrom von 0,4 m<sup>3</sup>/min. Somit sind in Tabelle 2 die charakteristischen Punkte der Netzkennlinien für die einzelnen Räume zusammengefaßt. Tabelle 2 läßt die wesentlichen Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen wie folgt erkennen:

- In den ausgewählten Meßräumen kann bei unbehinderter Überdruck-Ventilklappe ein Raum-Überdruck von 50 Pa mit einem Volumenstrom von 0,70 bis 0,85 m<sup>3</sup>/min (Verhältnis 1:1,21) erzielt werden.

Die Folge der Meßräume nach abnehmender Dichte lautet:

2; 5; 3; 1 und 4. Nur im Meßraum 4 war die Undichtigkeit so groß, daß ein größerer als der Nenn-Volumenstrom zur Erzeugung von 50 Pa aufgewendet werden mußte; im Meßraum 1 lag der Luft-Volumenstrom an der Grenze des Zulässigen.

- Die Undichtigkeiten der untersuchten Meßräume sind so gering, daß sie leicht durch eine Begrenzung der Überdruckventil-Öffnung korrigiert werden könnten. Mit arretierter Ventilklappe lagen die Fördermengen zwischen 0,125 und 0,37 m<sup>3</sup>/min (Verhältnis 1:3), das sind zwischen 12 und 39 % der bei betriebsgemäßem Zustand des Überdruckventils aufzuwendenden Volumenströme.

Sofern der Druckabfall nach Schnellschluß des Meßraumes gemessen wurde, sind die aus den Abklingzeiten für einen Druckabfall auf den e-ten Teil des Anfangsdrucks abgeschätzten Volumenströme zur Aufrechterhaltung einer gedachten stationären Durchströmung nicht identifizierbarer Undichtigkeiten mit in die entsprechenden Anlagen eingetragen.

Tabelle 2: Meßergebnisse im stationären Lüfterbetrieb

Meßgröße	Einheit	Meßraum-Nummer				
		1	2	3	4	5
Volumen $V_0$	m <sup>3</sup>	40,4	49,2	49,6	27,8	52,5
Nenn-Volumenstrom für Schutz-Lüftung $V = \frac{0,03}{1,38} V_0$	m <sup>3</sup> /min	0,88	1,07	1,08	0,60	1,14
Nenn-Drehzahl bei Nenn-Volumenstrom $n = \frac{55}{34,5} V_0$	min <sup>-1</sup>	64,4	78,4	79,1	44	83,7
Volumenstrom $V_{50}$ zur Erzeugung von $\Delta p = 50$ Pa						
OV betriebsgemäß	m <sup>3</sup> /min	0,79...0,92	0,67	0,85	0,70	0,79
OV arretiert	m <sup>3</sup> /min	0,28...0,40	0,125	0,37	0,23	0,22
Druck $\Delta p_{0,4}$ bzw. $\Delta p_{0,75}$						
$V = 0,4$ : OV betriebsgemäß	Pa	22...25	36	23	28	28
OV arretiert	Pa	51...83	>120	57	114	118
$V = 0,75$ : OV betriebsgemäß	Pa	41...48	53	44	53	48
OV arretiert	Pa	> 120	>>120	>120	>>120	>>120
Drehzahl $n$						
$V = 0,4$ : OV betriebsgemäß	min <sup>-1</sup>	33	32	-	-	32
OV arretiert	min <sup>-1</sup>	33	55	-	-	41
50 Pa: OV betriebsgemäß	min <sup>-1</sup>	68	55	63	-	61
OV arretiert	min <sup>-1</sup>	30	15	31	-	22
Abklingzeit $\tau$						
OV betriebsgemäß	s	1,5	2,3...4,3	-	-	3,6
OV arretiert	s	3,3	8,6...10,4	-	-	5,7

Der Volumenstrom in Abhängigkeit von der Drehzahl ist für einige Meßräume in den Anlagen 3, 5, 7 und 11 dargestellt. Wie man erkennt, ist bei frei beweglicher Ventilklappe des Überdruckventils für alle Volumenströme etwa dieselbe Lüfterdrehzahl erforderlich. Hingegen hängt bei arretiertem Ventil die Drehzahl von der Dichtigkeit des Raumes ab, mithin vom Drosselzustand des Lüfters.

Zusammenfassend ist festzuhalten, daß grundsätzlich auch in Schutzräumen mit Umfassungswänden aus Mauerwerk, selbst aus unverputztem Sichtmauerwerk, Gasdichtigkeit insoweit gegeben ist, als mit einer zumutbaren Lüfterdrehzahl ein Raumüberdruck von 50 Pa erreicht werden kann. Diese Aussage ist an zwei Voraussetzungen gebunden:

1. der Lüfter muß gemäß den entsprechenden Richtlinien an das Raumvolumen angepaßt sein,
2. sichtbare Undichtigkeiten und Durchbrüche müssen in geeigneter Weise dauerhaft verschlossen werden. Die hier angewendeten Maßnahmen, Abdichtung mit Folien, kunststoffbeschichteten Spanplatten oder Platten aus extrudiertem Schaumkunststoff unter Verwendung handelsüblicher Dichtungsmassen, sind als Provisorien anzusehen.

Im folgenden werden die Messungen und die Ergebnisse für die einzelnen Meßräume diskutiert.

#### Meßraum 1: Armaturenprüfstand

Wie bereits erwähnt, bot dieser Prüfstand mit zwei Bohrungen die Möglichkeit, die eine Bohrung im Ausgangszustand von 100 mm Durchmesser schrittweise zu verkleinern und insbesondere einen Rohrstutzen mit 60 mm Durchmesser einzusetzen, der mit unterschiedlich perforierten Kappen zu verschließen war. Bei diesen ersten, bereits im Oktober/November 1984 ausgeführten Messungen wurde die Luft durch die andere der beiden Öffnungen eingeblasen und durch diese auch ein Schlauch zur Bestimmung des Überdrucks geführt; das Überdruckventil war noch nicht vorhanden.

Zahlreiche Messungen bei unterschiedlicher Dichtigkeit des Meßraumes konnten durchgeführt werden, siehe Anlage 1. Die Wirkung der einzelnen Schritte mit zunehmender Abdichtung ist gut zu erkennen. Kleine, konzentriert angeordnete Löcher, z.B. 17 Bohrungen von 2,0 mm Durchmesser auf einer Fläche von 25 cm<sup>2</sup>, wirken sich nicht mehr wesentlich auf den Volumenstrom aus: Diverse Messungen mit weniger Löchern oder Löchern noch kleineren Durchmessers (1,1 mm) erbrachten keine unterscheidbaren Ergebnisse. Dies dürfte mit der dabei erreichten maximalen Dichtigkeit zusammenhängen.

Kurve 1 bezieht sich auf das verschlossene Rohr, das mit Mineralwolle und Kittabdichtung in die Wandbohrung eingesetzt war. Verschließt man - nach Entfernen dieses Rohres - die Bohrung vollständig, ergibt sich eine noch steilere Netzkennlinie, siehe Anlage 2, was auch auf dem Einfluß nicht ganz dicht schließender Doppeltüren beruhen mag; denn bei der Mitte 1985 durchgeführten, der Anlage 2 zugrunde liegenden Wiederholungsmessung wurden die Türen ausgehängt und durch eine der beschriebenen, umlaufend abgedichteten Raum-Abschlußplatten ersetzt.

Aus Anlage 2 geht insbesondere hervor, wie das Oberdruckventil im Vergleich zu einer Öffnung von 40 mm Durchmesser wirkt. Während die Öffnung dasselbe  $\Delta p(V)$ -Verhalten zeigt wie mehr oder weniger dichte Räume, ergibt sich durch das Oberdruckventil meist ein unterlineares Verhalten (konvexer Verlauf der Netzkennlinie): Bei geringem Volumenstrom höherer Druck, bei großem Volumenstrom geringerer Druck im Meßraum als sich mit einer Vergleichsöffnung von 40 mm Durchmesser einstellt.

In Anlage 2 fällt ferner auf, daß sich für die beiden unterschiedlichen Luft-Einblasmethoden unterschiedliche Netzkennlinien ergaben, insbesondere ist der Luftbedarf zur Erzeugung eines bestimmten Druckes dann größer, wenn die Luft über die Ecke der Raum-Abschlußplatte eingeblasen wird. Diese Differenz dürfte auf der unterschiedlichen Schlauchführung für die Zuluft beruhen; sie konnte im Nachhinein nicht befriedigend geklärt werden.

Die aus dem Abklingen des Drucks bestimmten Volumenströme stimmen tendenziell gut mit den Netzkennlinien für stationäre Luftförderung überein.

Der Volumenstrom in Abhängigkeit von der Drehzahl (Anlage 3) läßt sich gleichermaßen für alle Betriebszustände durch  $V = 0,0122 n$  beschreiben, was mit der insgesamt relativ geringen Dichtigkeit des Meßraumes 1 zusammenhängt, vgl. hierzu Meßraum 2 (Anlage 5).

#### Meßraum 2: Wand-Prüfstand

Wie bereits im vorigen Abschnitt ausgeführt, wurde in einen Wand-Prüfstand zur Bestimmung der Luftschalldämmung nach DIN 52 210 als Trennwand eine 24 cm dicke, 12 m<sup>2</sup> große Wand teils aus Abbruch-Vollziegelmauerwerk (5 m<sup>2</sup>), teils aus neuen KSV-Steinen (7 m<sup>2</sup>) mit schlechtest möglicher Mörtelqualität (Kalk:Sand 1:6) aufgemauert. In einem Raum wurden Messungen der Gasdichtigkeit im Laufe der folgenden Wochen bei mehreren Zuständen der Wand ausgeführt:

- a) ohne Putz, Fugen geglättet (Sichtmauerwerk)
- b) mit Putz auf dem KSV-Mauerwerk (einseitig)
- c) wie b), jedoch Fugen im Ziegel-Mauerwerk einseitig ca. 5 mm tief ausgekratzt (durch das Fugen verdichtete Oberflächenschicht entfernt)
- d) wie c), jedoch Fugen im Ziegelmauerwerk beidseitig ausgekratzt

Bedauerlicherweise stand der Prüfstand insgesamt nur 3 Monate zur Verfügung, so daß eine die Durchlässigkeit vergrößernde Austrocknung der Wand in diesem Zeitraum nicht angenommen werden kann. Immerhin war die Qualität des Mauermörtels so schlecht, daß sich dieser beim Abbruch der Wand von den Steinen leicht löste; die Steine konnten wiederverwendet werden. Mithin muß bei dieser Wand von der größtmöglichen Undichtigkeit eines rissefreien Mauerwerks ausgegangen werden.

Das bewertete Schalldämm-Maß der ca. 450 kg/m<sup>2</sup> schweren Wand wurde zu  $R'_w = 53$  dB ermittelt, also 1 dB weniger als der Richtwert gemäß DIN 4109 Teil 3. Da die Schalldämmung einer Wand auch von deren Dichtigkeit abhängt, ist dies ein Zeichen für einen nicht optimal fugendichten Wandaufbau.

Die Messungen der Gasdichtigkeit ergaben jedoch keine signifikanten Unterschiede für die einzelnen Zustände. Deshalb konnte ein Mittelwert aus 9 Einzelmessungen gebildet werden. Wie Tabelle 2 ausweist, war dieser Meßraum - ohne Risse - der dichteste von allen untersuchten Räumen.

Die Einzelwerte für alle Bauzustände sind in Anlage 4 eingetragen, die Mittelwerte und der Wertebereich der Einzelmessungen in Anlage 6 dargestellt.

Bei den einzelnen Zuständen der Wand wurde auch die Abklingzeit gemessen. Dabei zeigte es sich, daß der hierfür zur Verfügung stehende Druckbereich ( $\Delta p \leq 100$  Pa) zu klein ist: Bei niedrigem Druck ( $\Delta p \leq 20$  Pa) führen umgebungsbedingte Druckschwankungen leicht zur Verfälschung der Druck-Abklingkurven.

Die aus der Abklingzeit abgeschätzten, in Anlage 6 eingetragenen Werte für den Volumenstrom gehören zu folgenden Zuständen:

- a) ohne Putz                      b) mit Putz auf KSV-Mauerwerk

Aus den unterschiedlichen Volumenströmen, die sich für eine bestimmte Druckdifferenz ergeben, muß man schließen, daß der Putz eine abdichtende Wirkung besitzt. Allerdings kann gegenwärtig die Frage noch nicht beantwortet werden, ob und inwieweit aus dem zeitlichen Abklingen des Druckes ein grundsätzlich größerer Aufschluß über die Größe und Bedeutung von Undichtigkeiten gewonnen werden kann als aus dem stationären Verfahren zu erlangen ist. Hierzu müßte die Meßgenauigkeit erheblich gesteigert werden, was einen motorbetriebenen Lüfter und ein elektrisch steuerbares Schnellschlußventil voraussetzt.

Die Fördermenge des Lüfters gemäß den Anlagen 5 und 7 hängt bei gleicher Drehzahl von dem Grad der Undichtigkeit ab. Es gilt daher, im Mittel:

Überdruckventil betriebsgemäß  $V = 0,0126 \text{ n}$

Überdruckventil-Klappe arretiert  $V = 0,0074 \text{ n}$

Der Unterschied beruht auf der Rückwirkung des dichten Raumes auf die Luftförderleistung des Lüfters, vgl. hierzu Meßraum 1, Anlage 3.

### Meßraum 3: Hobby-Keller in Reihenhaushaus

Im Versuch wurde die Luft nur über die rechte obere Ecke der Raum-Abschlußplatte eingeblasen. Damit entfällt die Messung der Abklingzeit. Wie die in Anlage 8 dargestellte Netzkennlinie ausweist, handelt es sich um einen wenig dichten Raum, der allerdings in Anbetracht seiner Größe die zu stellenden Anforderungen noch erfüllt.

Vor der Messung mußte ein erheblicher Abdichtungsaufwand getrieben werden, weil der Meßraum über eine weitere Tür und drei Wandöffnungen mit einem fensterlosen Nebenkeller verbunden ist. Er besitzt außerdem zwei Außenfenster, vgl. Tab. 1, Fußnoten 4 und 7.

Interessant ist die hervorragende Übereinstimmung zwischen Wiederholungsmessung und erster Messung (noch ohne Überdruckventil) im Abstand von  $5 \frac{1}{2}$  Monaten. Dabei ist hervorzuheben, daß zwischenzeitlich alle Abdichtungsmaßnahmen rückgängig gemacht bzw. aus Anlaß der zweiten Messung neu und in teilweise abweichender Form ausgeführt wurden.

Die Drehzahl am SL 0,75 für 50 Pa beträgt bei normaler OV-Stellung  $63 \text{ min}^{-1}$  und bei arretiertem OV  $31 \text{ min}^{-1}$ .

#### Meßraum 4: Vorratskeller im Reihenhaus

Die Besonderheit dieser Messungen liegt im Vergleich der beiden unterschiedlichen Lüfter. Dabei mußte auf ein Einblasen der Luft durch die Schnellschlußarmatur verzichtet werden, weil der elektrisch betriebene Lüfter ERM 18 an diese nicht angebaut werden konnte.

Die Übereinstimmung der Ergebnisse ist sehr gut, wie die Netzkennlinien gemäß Anlage 9 zeigen, obwohl zur Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit unterschiedliche Meßverfahren angewendet wurden: Die Geschwindigkeit der Luft im Ansaugrohr des ERM 18 war wegen des großen Rohrdurchmessers so klein, daß diese nicht mehr mit einem Staurohr, sondern mit einem temperaturkompensierten Hitzdraht-Anemometer gemessen werden mußte.

Mit dem elektrisch betriebenen Lüfter konnten größere Volumenströme erzielt werden, wie Anlage 9 ausweist, etwa 1,7 m<sup>3</sup>/min, was für die Prüfung von Räumen mit größeren Undichtigkeiten von besonderem Interesse ist.

Die Netzkennlinien lassen erkennen, daß der Raum unter Berücksichtigung seiner geringen Größe als nicht gasdicht angesehen werden muß. Die Ursache dürfte im Vorhandensein der zahlreichen klaffenden Risse liegen, die zu einer besseren Beurteilung des Einflusses von Undichtigkeiten absichtlich nicht verschlossen worden sind.

Ferner ist auffällig, daß bei normal öffnender Überdruckklappe noch ein relativ hoher Druck erreicht wird, z.B. bei 0,75 m<sup>3</sup>/s noch 53 Pa, bei den Meßräumen 1 und 3 jedoch nur 44 Pa.

#### Meßraum 5: Schutzbunker aus dem Jahre 1941

Die Netzkennlinie zeigt Anlage 10, den bei bestimmter Lüfter-Drehzahl geförderten Volumenstrom Anlage 11.

Die aus dem Druck-Abklingvorgang bestimmten Volumenströme liegen für arretiertes Überdruckventil wiederum unterhalb der



Netzkennlinie, lassen also für einen bestimmten Überdruck im Meßraum einen höheren Volumenstrom (Durchsatz durch Undichtigkeiten) erwarten. Hingegen ergeben sich bei frei beweglicher Klappe des Überdruckventils scheinbar zu kleine Volumenströme bei Vorgabe eines bestimmten Raumüberdrucks. Aus diesem unterschiedlichen Verhalten muß man schließen, daß eine instationäre Messung zu weniger differenzierten Meßwerten führt, also weniger geeignet ist, einen Raumzustand zu charakterisieren als eine Messung bei stationärem Druck.

Bemerkenswert erscheint die gute Übereinstimmung der Netzkennlinien für verschiedene Einblasorte. Im Gegensatz zu Meßraum 1 konnten hier Unterschiede nicht festgestellt werden. Hinsichtlich der Lüfter-Drehzahl weist Anlage 11 folgendes aus:

Überdruckventil betriebsmäßig	$V = 0,0128 \text{ n}$
Überdruckventil arretiert	$V = 0,0098 \text{ n}$

Es ist also auch hier eine Drosselung des Lüfters durch Raumrückwirkung vorhanden, wenngleich nicht so deutlich wie im wesentlich gasdichteren Meßraum 2.

#### 4. Zusammenfassung

Die durchgeführten Untersuchungen haben zwar deutliche Unterschiede der Gasdichtigkeit von fünf Meßräumen mit gemauerten Wänden aufgezeigt, jedoch sind diese Unterschiede nicht so groß, als daß Mauerwerk für Schutzräume grundsätzlich ungeeignet wäre. Durchbrüche und Fenster können auch noch nachträglich im Rahmen der an Schutzräume zu stellenden Anforderungen auf vielerlei Weise dauerhaft gasdicht verschlossen werden.

Das angewendete Meßverfahren hat sich zur Bestimmung der Gasdichtigkeit von Kellerräumen - vor Ort - und damit zur Beurteilung ihrer Eignung als Schutzraum als brauchbar erwiesen. Bedauerlicherweise standen von Hausschutzräumen Netzkennlinien, ermittelt mit den darin installierten Lüftern, für Vergleichszwecke nicht zur Verfügung.

Die nicht optimale Dichtigkeit einiger Räume läßt sich durch eine geringfügig höhere Förderleistung der Lüfter oder durch Beeinflussung des Überdruckventils - im Sinne einer geringeren Ventilöffnung - leicht korrigieren. Allerdings sollte die höhere Förderleistung nicht durch höhere Lüfter-Drehzahlen erreicht werden, denn diese liegen bereits jetzt am oberen Ende des Vertretbaren.

## L i t e r a t u r

- /1/ Bong, H. und Kutsch, A.:  
Raumlufthtechnische Anlagen in Schutzräumen  
Münch Verlag Bonn. Bonn-Bad Godesberg 1979
- /2/ Bautechnische Grundsätze für Hausschutzräume des  
Grundschatzes (Fassung Februar 1972).  
Bekanntmachung des Bundesministers für Städtebau  
und Wohnungswesen vom 10.02.1972.  
Beilage zum Bundesanzeiger Nr. 53 vom 16. März 1972  
und Nr. 143 vom 03.08.1976.
- /3/ DIN 1946: Lüftungstechnische Anlagen (VDI-Lüftungs-  
regeln), Teil 1: Grundregeln, Abschnitt 4.32.
- Recknagel-Sprenger: Taschenbuch für Heizung und Klima-  
technik, 61. Ausgabe.  
R. Oldenbourg-Verlag, München, Wien 1981.

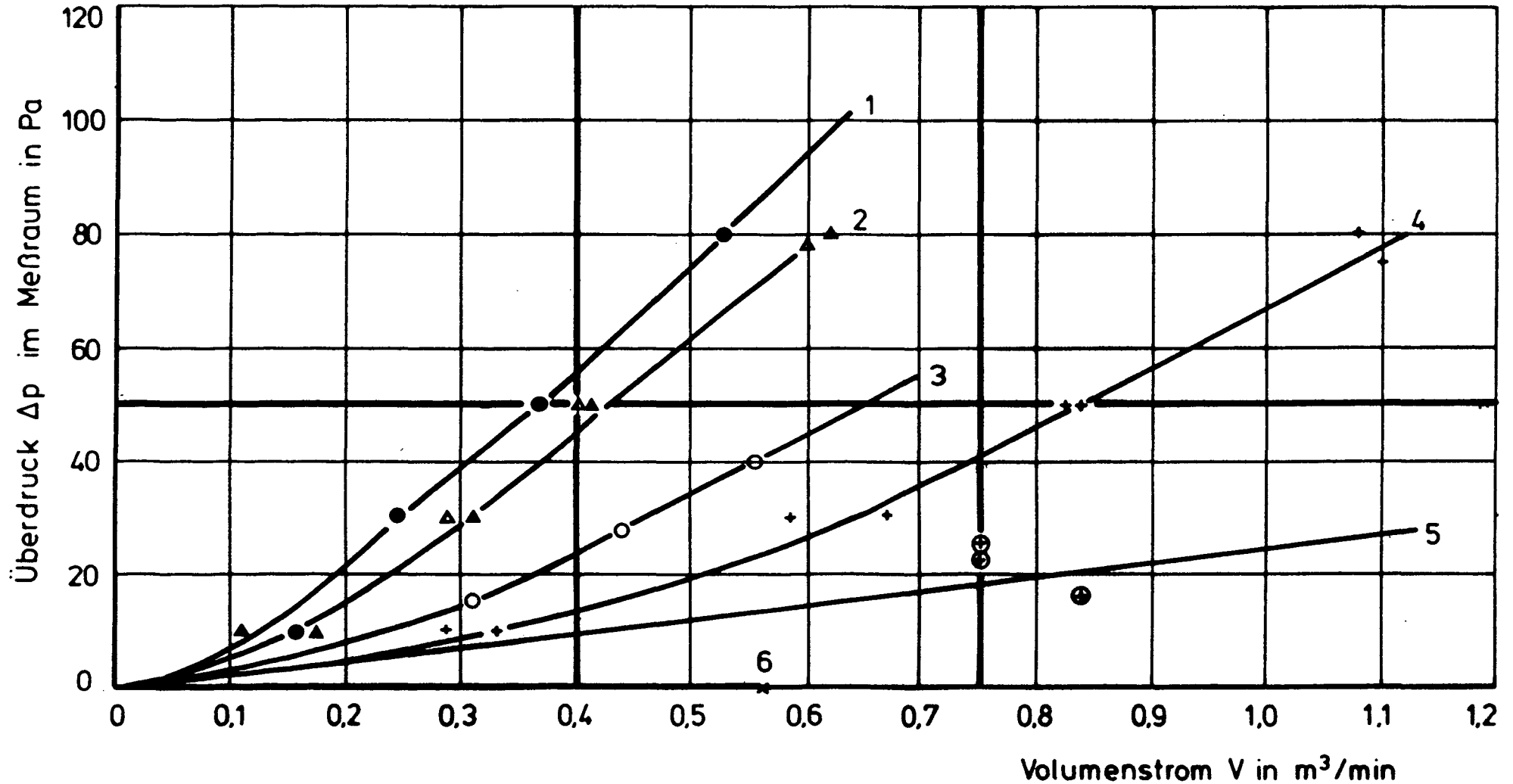
# Messungen bei unterschiedlichem Abdichtungszustand

einer Bohrung von 100 mm Ø in Wand 1:

1. Abschlußplatte mit dichter Kappe
2. Abschlußplatte mit 17 Bohrungen Ø 2,0 mm
3. Bohrung Ø 100 mm mit Mineralwolle verstopft
4. Bohrung auf Ø 40 mm verkleinert; offen
5. Bohrung auf Ø 70 mm verkleinert; offen
6. Bohrung Ø 100 mm; offen

Meßraum 1: Armaturen-Prüfstand

$$V_0 = 40,4 \text{ m}^3; \quad A_0 = 14,5 \text{ m}^2$$



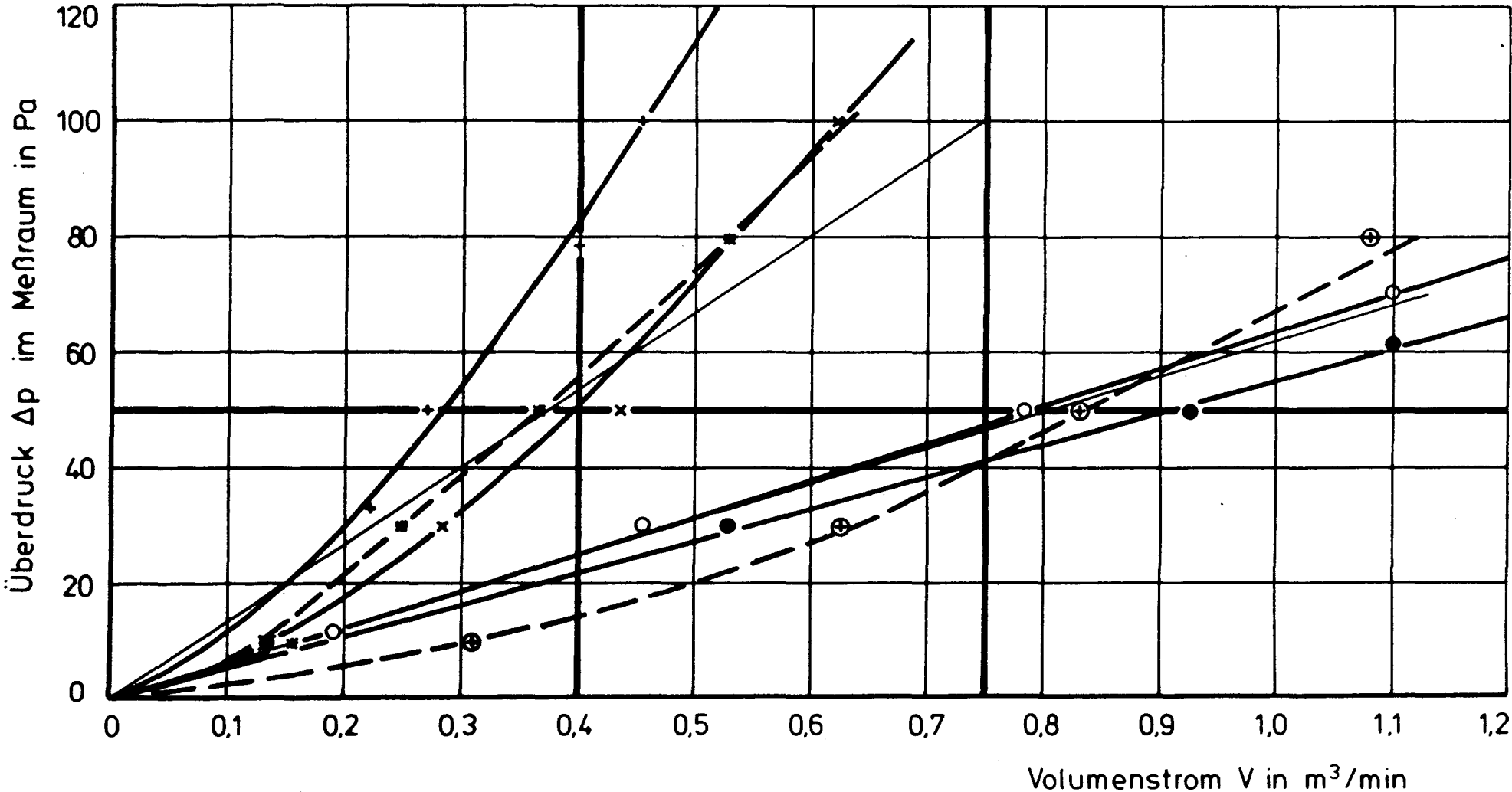
- Anlage 1 -

Messungen mit Raum-Abschlußplatte

Meßraum 1: Armaturen-Prüfstand

$V_0 = 40,4 \text{ m}^3; A_0 = 14,5 \text{ m}^2$

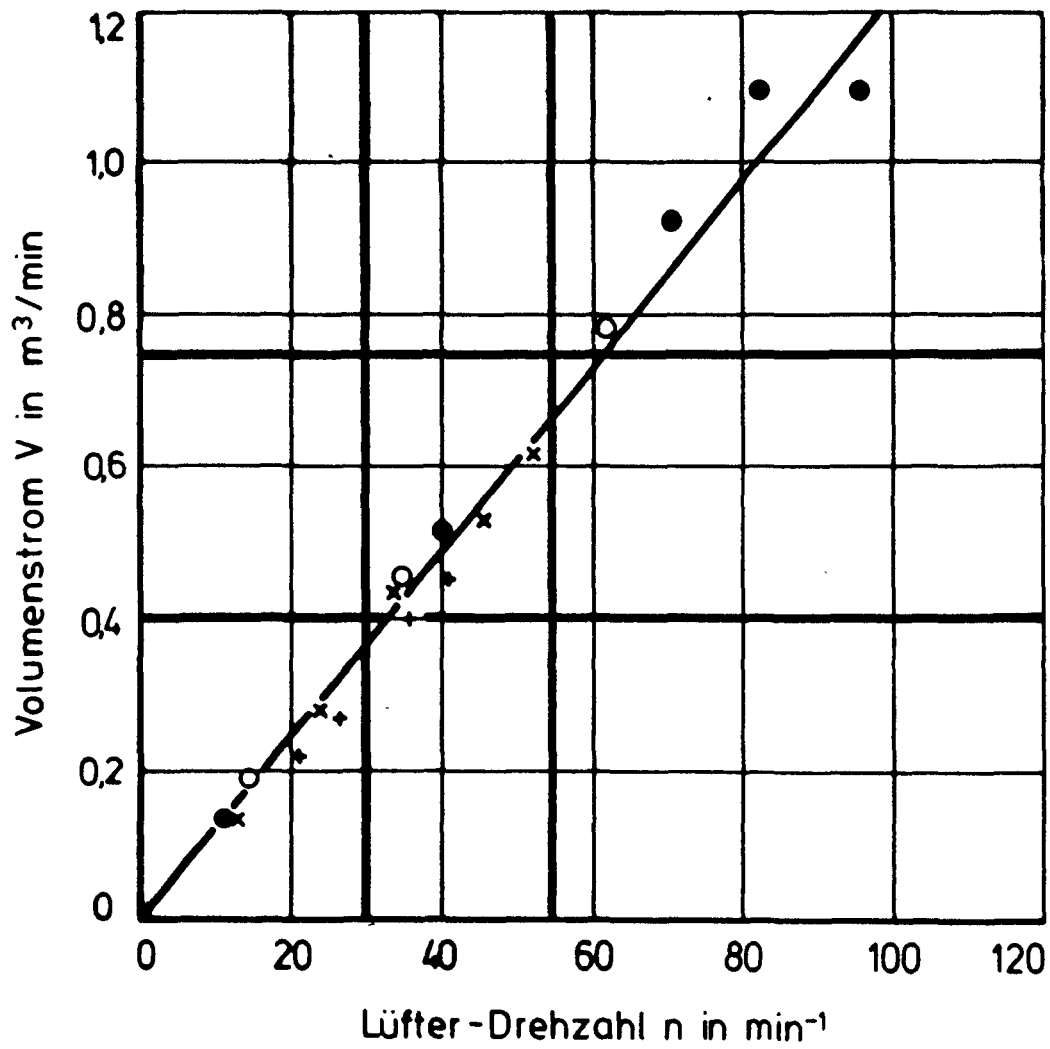
- OV betriebsgemäß, Einblasen direkt
- OV betriebsgemäß, Einblasen SSA
- × OV-Klappe arretiert, Einblasen direkt
- + OV-Klappe arretiert, Einblasen SSA
- Messungen 1 und 4 gemäß Anlage 1
- aus Abklingzeit berechnet



- Anlage 2 -

Meßraum 1: Armaturen-Prüfstand

- ÜV betriebsgemäß, Einblasen direkt
- ÜV betriebsgemäß, Einblasen SSA
- × ÜV-Klappe arretiert, Einblasen direkt
- + ÜV-Klappe arretiert, Einblasen SSA

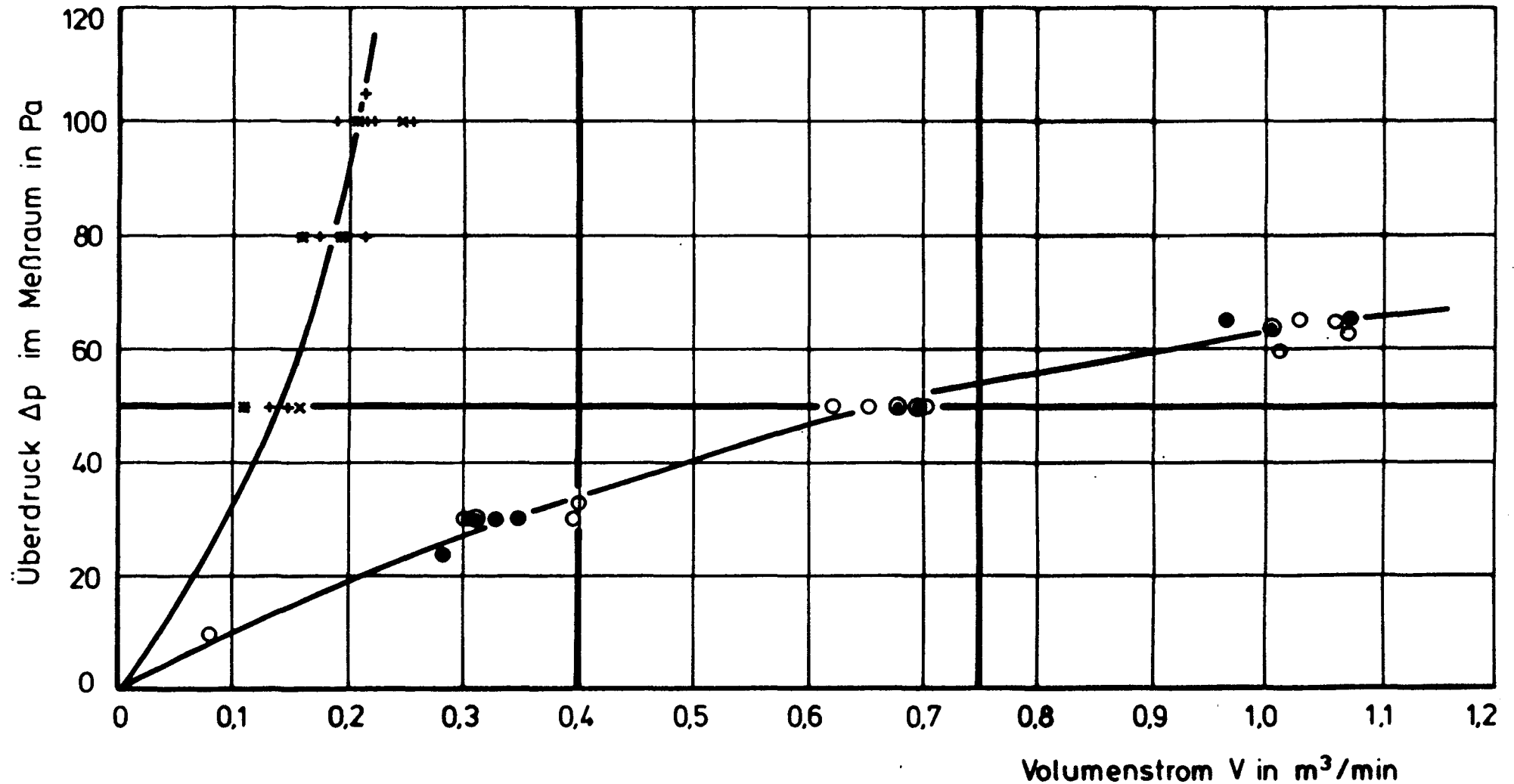


Meßraum 2: Wand-Prüfstand

$V_0 = 49,2 \text{ m}^3$ ;  $A_0 = 18,6 \text{ m}^2$

Einzelwerte für alle Bauzustände

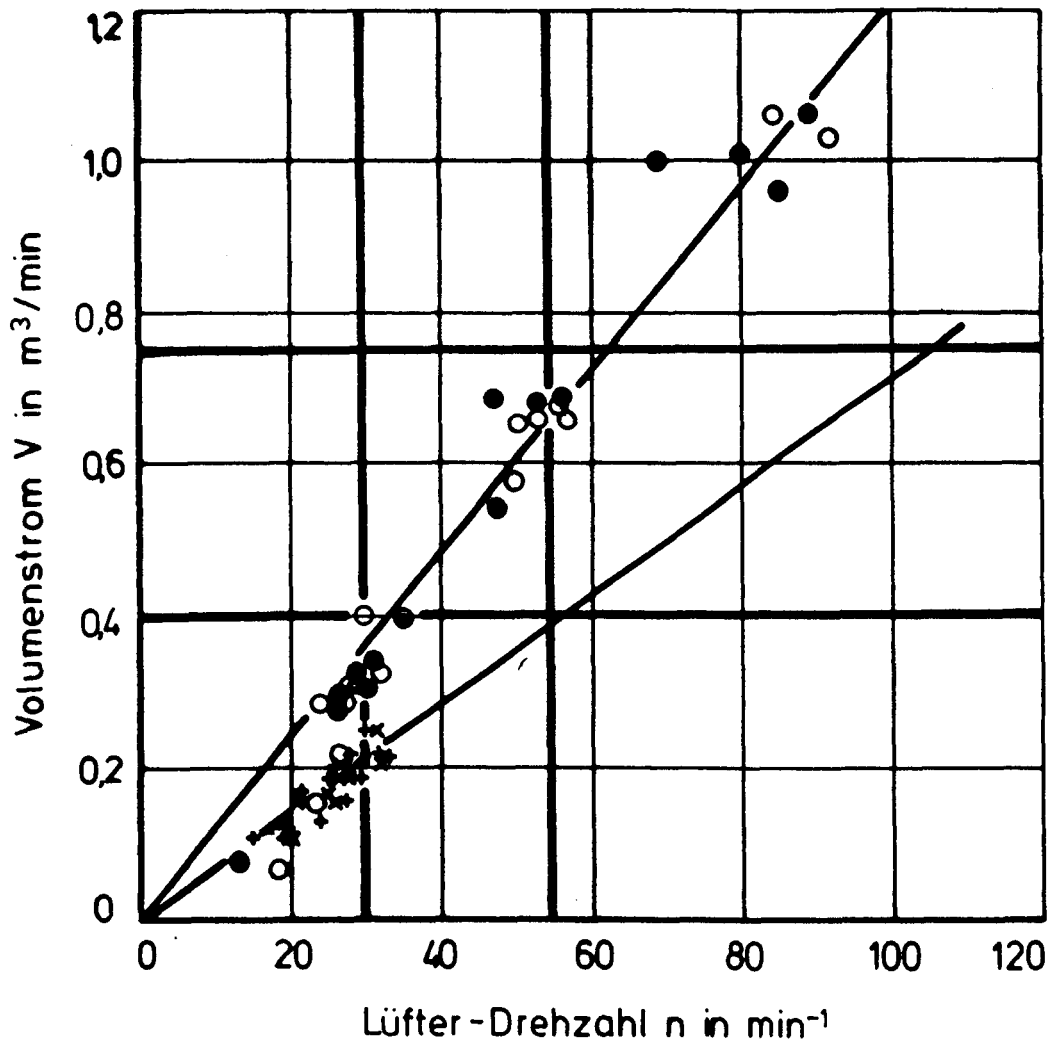
- ÜV betriebsgemäß, Einblasen direkt
- ÜV betriebsgemäß, Einblasen SSA
- × ÜV-Klappe arretiert, Einblasen direkt
- + ÜV-Klappe arretiert, Einblasen SSA



Meßraum 2: Wand-Prüfstand

Einzelwerte für alle Bauzustände

- ÜV betriebsgemäß, Einblasen direkt
- ÜV betriebsgemäß, Einblasen SSA
- × ÜV-Klappe arretiert, Einblasen direkt
- + ÜV-Klappe arretiert, Einblasen SSA



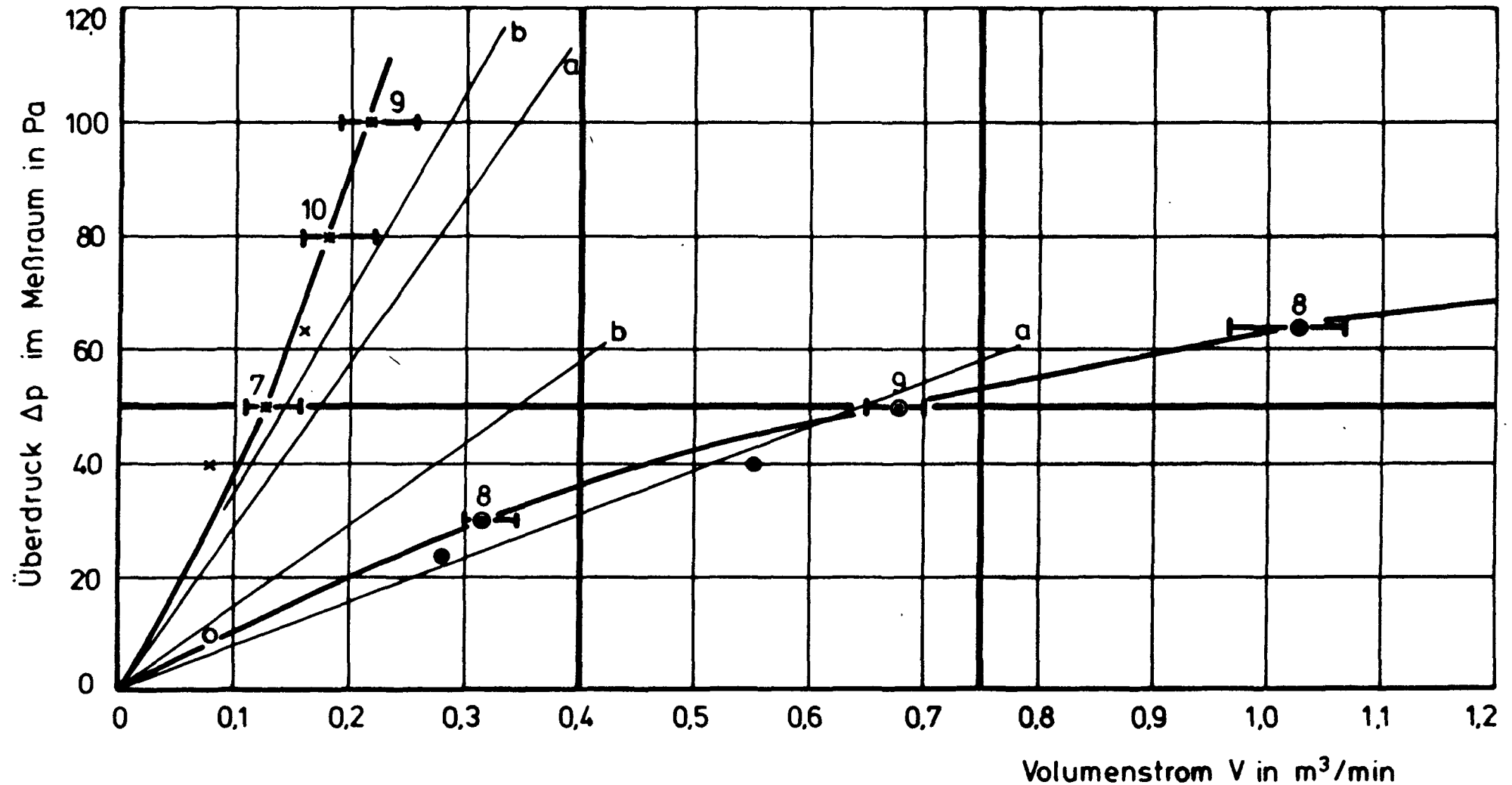


Mittelwerte und Wertebereich für alle Bauzustände

Meßraum 2: Wand-Prüfstand

$V_0 = 49,2 \text{ m}^3$ ;  $A_0 = 18,6 \text{ m}^2$

- OV betriebsgemäß, Einblasen direkt
- OV betriebsgemäß, Einblasen SSA
- × OV-Klappe arretiert, Einblasen direkt
- + OV-Klappe arretiert, Einblasen SSA
- aus Abklingzeit berechnet:
- a: ohne Putz
- b: mit Putz auf KSV

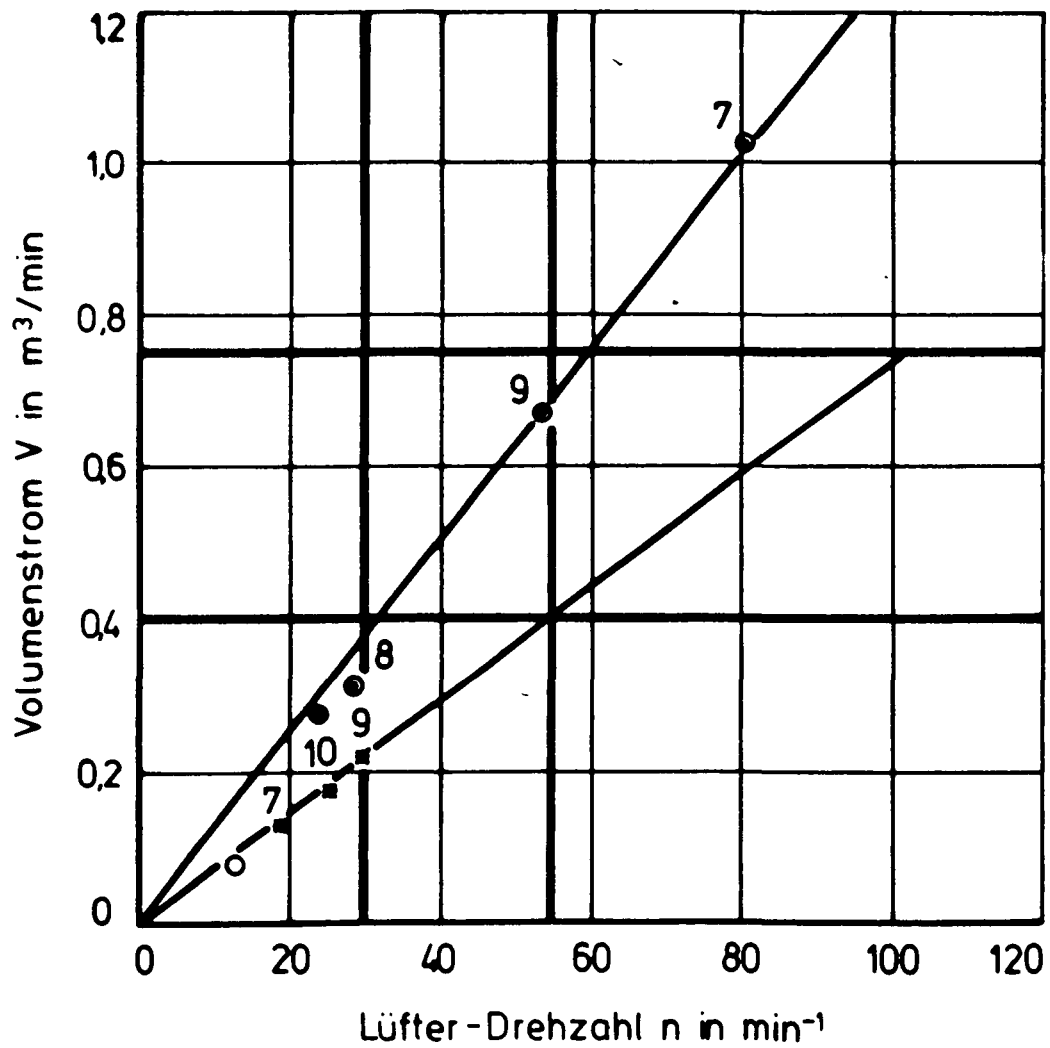


- Anlage 6 -

Meßraum 2: Wand-Prüfstand

Mittelwerte für alle Bauzustände

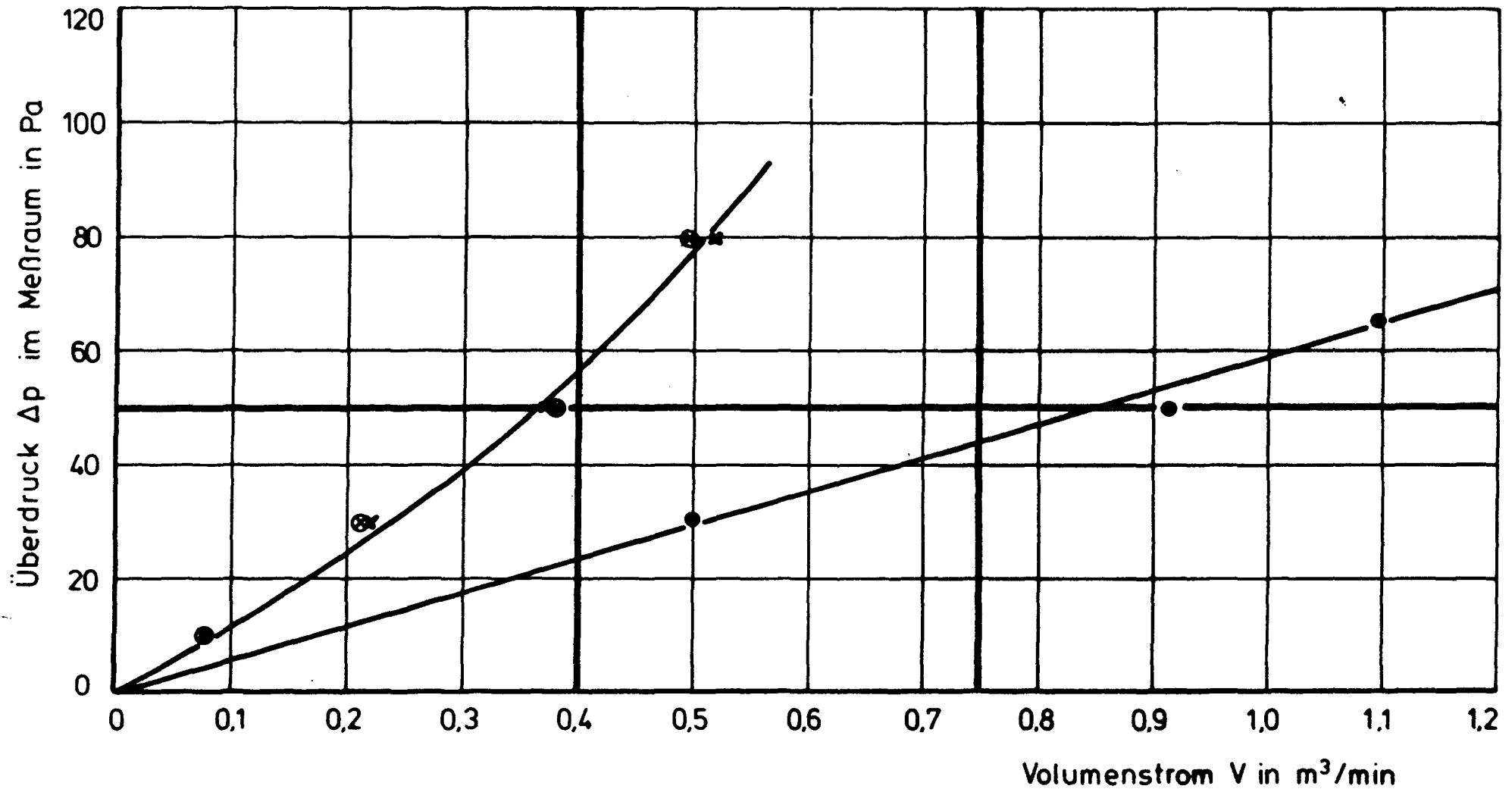
- ÜV betriebsgemäß, Einblasen direkt
- ÜV betriebsgemäß, Einblasen SSA
- × ÜV-Klappe arretiert, Einblasen direkt
- + ÜV-Klappe arretiert, Einblasen SSA



Meßraum 3: Hobbykeller (Reihenhaus)

$$V_0 = 49,6 \text{ m}^3; A_0 = 23,6 \text{ m}^2$$

- ÜV betriebsgemäß, Einblasen direkt
- × ÜV-Klappe arretiert, Einblasen direkt
- ⊗ ohne ÜV, Einblasen direkt  
(Messung 5 1/2 Monate vor × - Messung)

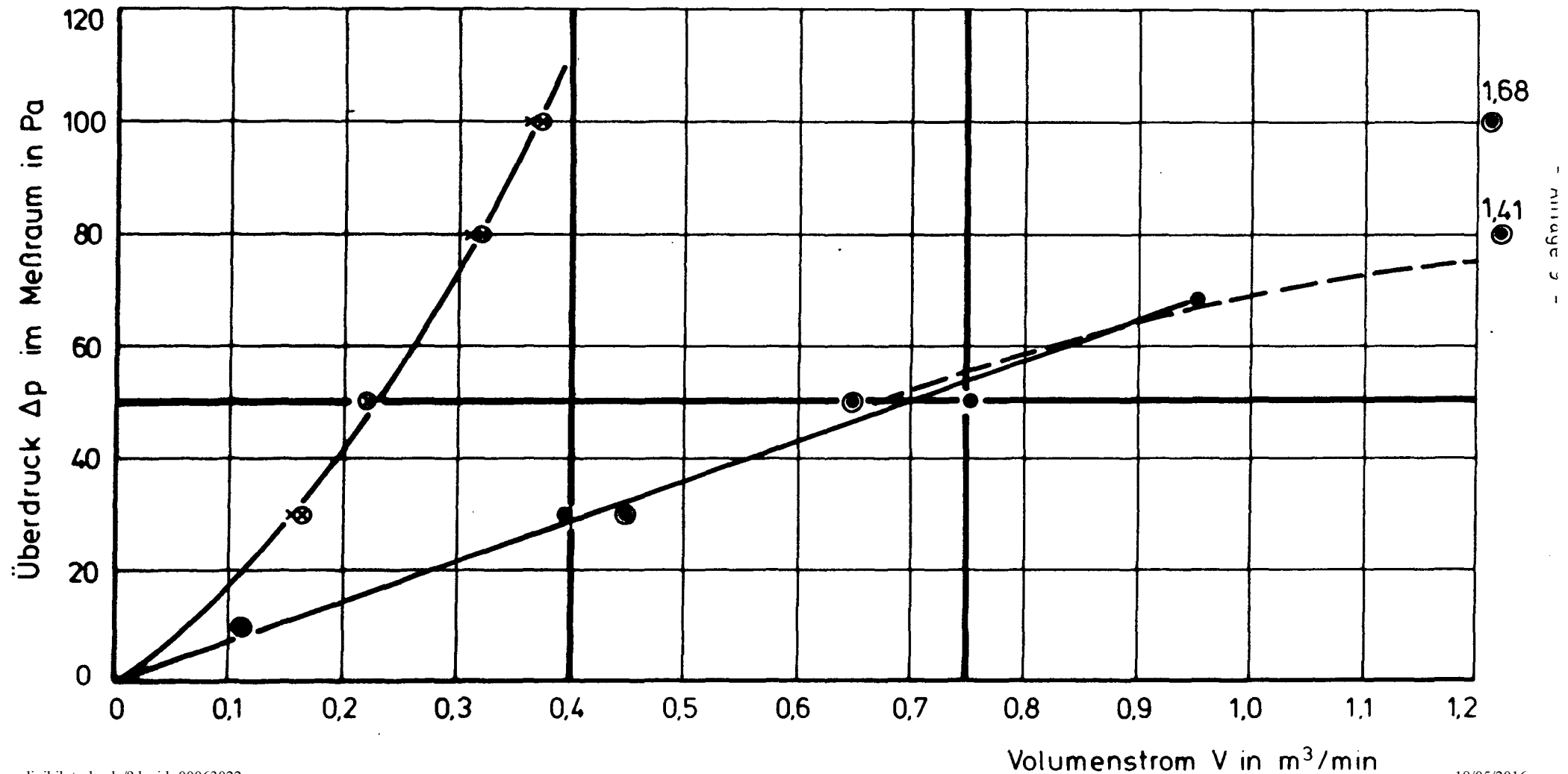


- Anlage 8 -

Meßraum 4: Vorratskeller (Reihenhaus)

$$V_0 = 27,8 \text{ m}^3; A_0 = 13,3 \text{ m}^2$$

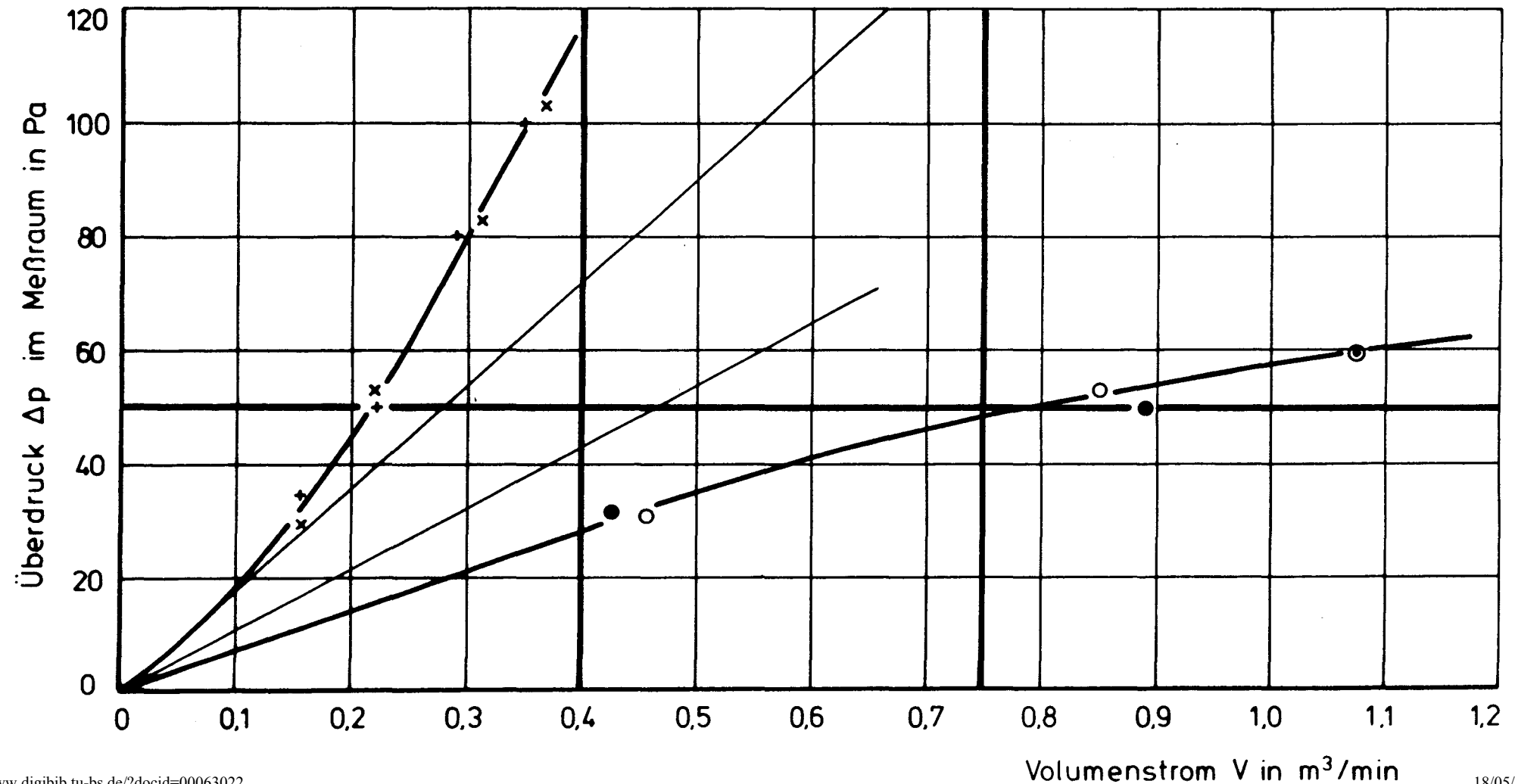
- , x Lüfter SL 0,75, Einblasen direkt
- ⊙, ⊗ Lüfter ERM 18, Einblasen direkt
- , ⊙ ÜV betriebsgemäß
- x, ⊗ ÜV-Klappe arretiert



Meßraum 5: Schutzraum im Bunker

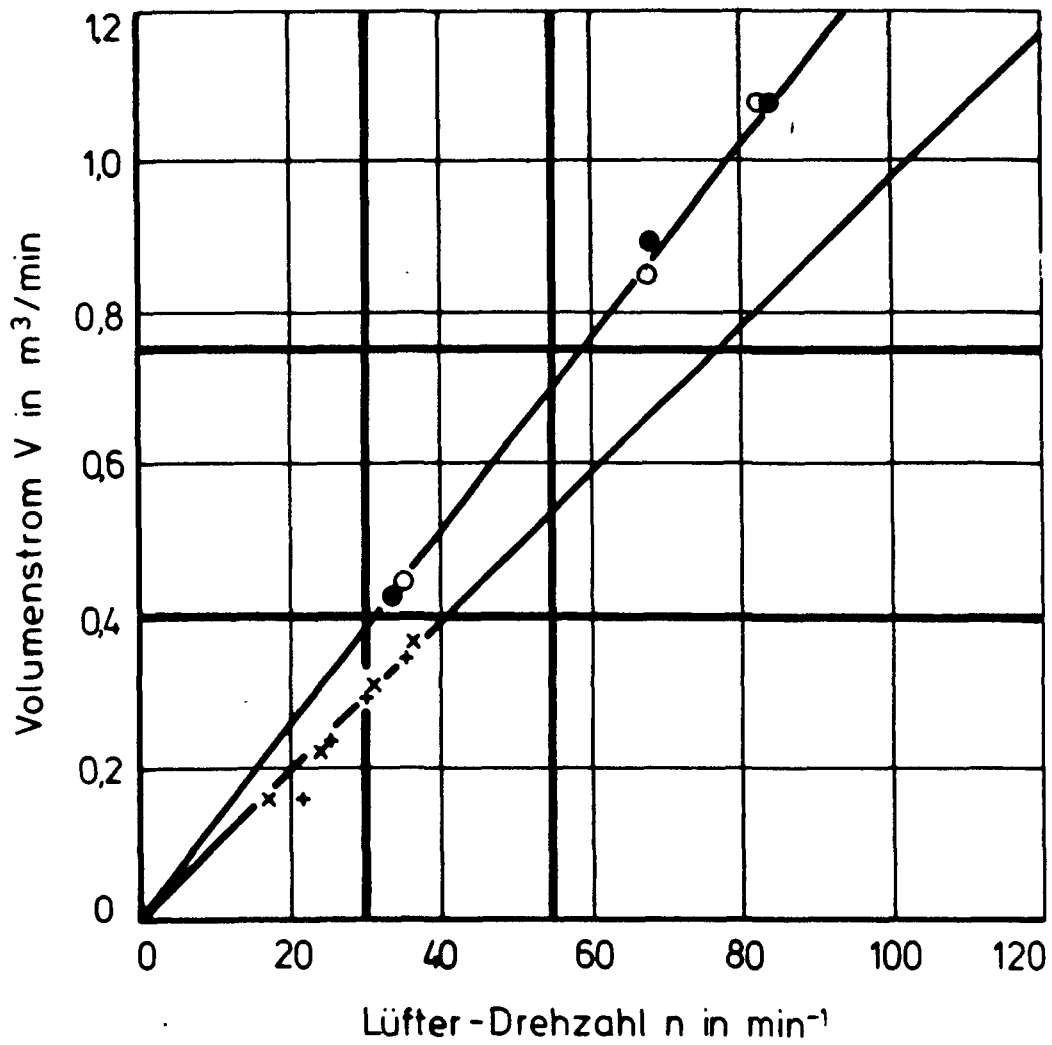
$$V_0 = 52,5 \text{ m}^3; A_0 = 20,1 \text{ m}^2$$

- ÖV betriebsgemäß, Einblasen direkt
- ÖV betriebsgemäß, Einblasen SSA
- × ÖV-Klappe arretiert, Einblasen direkt
- + ÖV-Klappe arretiert, Einblasen SSA
- aus Abklingzeit berechnet



Meßraum 5: Schutzraum im Bunker

- OV betriebsgemäß, Einblasen direkt
- OV betriebsgemäß, Einblasen SSA
- × OV-Klappe arretiert, Einblasen direkt
- + OV-Klappe arretiert, Einblasen SSA



Herleitung der Beziehungen zwischen stationärem Durchfluß und Druckabfall nach Schließen der Schnellschlußarmatur

Symbole und ihre Bedeutung

M      Masse der im Raum befindlichen ( $M_R$ ) oder durch Undichtigkeiten der raumumschließenden Bauteile ( $M_B$ ) entweichenden Luft

$V_0$     Volumen des Meßraumes

$\rho$       Dichte der Luft: 1,2 kg/m<sup>3</sup>

K       $= \frac{m}{RT} = 1,214 \cdot 10^{-5} \frac{s^2}{m^2}$     Konstante, gebildet aus Gaskonstante R sowie Molekulargewicht m und Temperatur T (= 293 K) der Luft

r       $= \frac{\Delta p}{V}$     Strömungswiderstand für ein durchlässiges System, das im stationären Zustand der Gleichung für eine laminare Strömung oder Sickerströmung genügt:

$$V = \frac{1}{\rho} \frac{dM_B}{dt} = \frac{\Delta p}{r} \quad (1)$$

mit

V:    Volumenstrom in m<sup>3</sup>/s

$\Delta p = p_i - p_a$ : Druckdifferenz zwischen Raumluft ( $p_i$ ) und Außenluft ( $p_a$ )

t      Zeit

Der in den Meßraum eingeblasene Luft-Massenstrom entweicht nach Schließen der Schnellschlußarmatur durch Undichtigkeiten der Umfassungswände. Es gilt somit die folgende Bilanz.

$$\frac{dM_R}{dt} + \frac{dM_B}{dt} = 0 \quad (2)$$

oder - unter Beachtung der allgemeinen Gas-Zustandsgleichung und der Definition des Strömungswiderstandes

$$KV_o \frac{dp_i}{dt} + \frac{\rho}{r} (p_i - p_a) = 0 \quad (3)$$

Diese Differentialgleichung läßt sich - unter Einführung der Abklingzeit

$$\tau = \frac{KV_o r}{\rho} \quad (4)$$

umformen:

$$\tau \frac{dp_i}{dt} + p_i = p_a \quad (5)$$

Mit der Lösung ( $t = 0: p_i - p_a = \Delta p_o$ )

$$p_i = p_a + \Delta p_o e^{-t/\tau} \quad (6)$$

Aus Gl. (4) ergibt sich nach Elimination des Strömungswiderstandes

$$V = \frac{K}{\rho} V_o \cdot \frac{\Delta p}{\tau} = 0,6 \cdot 10^{-3} V_o \frac{\Delta p}{\tau} \text{ in m}^3/\text{min.}$$

Die Bestimmung der Abklingzeit  $\tau$  erfolgt durch Messung des Druckabfalls über dem e-ten Teil des Anfangsdruckes, vgl. Gl. (6) unter Verwendung eines Pegelschreibers;

$$\text{Pegeldifferenz } \Delta L = 20 \lg \frac{\Delta p(\tau)}{\Delta p(t=0)} = -20 \lg e = -8,7 \text{ dB.}$$